

0 7 2 4 9 7 2 -1

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

Маланушенко Елена Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ СОЛНЦА
В ОБЛАСТИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР**

Специальность 01.03.03 - Физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2001

Работа выполнена в Крымской астрофизической обсерватории Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Степанян Н.Н.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Боровик В.Н.
кандидат физико-математических наук
Ким И.С.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



Ведущая организация: Институт Земного Магнетизма, Ионы-
сферы и Распространения Радиоволн
Российской Академии Наук

Защита состоится “ 8 ” февраля 2002 г.
в 11 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета
K002.120.01 по защите диссертаций на соискание ученой степе-
ни кандидата физико-математических наук в Главной астроно-
мической обсерватории Российской Академии Наук по адресу:
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65/1, ГАО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан “ 4 ” января 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, flowing letters that appear to be 'E.V. Miletskiy'.

Милецкий Е.В.

Актуальность проблемы

Корональные дыры (КД) – это крупномасштабные образования в солнечной короне с открытой конфигурацией магнитных силовых линий, расположенные в униполярных ячейках фоновых магнитных полей. Основная особенность КД состоит в том, что они являются источниками высокоскоростного солнечного ветра, влияющего на межпланетное пространство и на гелиосферу Земли. Поэтому исследование КД представляет значительный интерес как для изучения физики Солнца, так и для геофизики и физики плазмы.

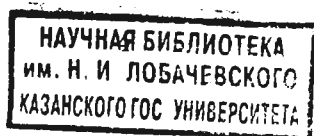
Основные характеристики КД следующие: значительно понижена яркость в рентгеновском, ультрафиолетовом и микроволновом излучении, ослаблена зеленая корональная линия, увеличены скорости потоков солнечного ветра. С Земли КД наблюдаются обычно только в линии He I 1083.03 нм (далее в тексте He I) и характеризуются увеличением яркости (1-4%) и уменьшением контраста хромосферной сетки [1]. Линия He I образуется в верхней хромосфере на высоте около 2000 км и возбуждается ультрафиолетовым излучением [2]. На спектрогелиограммах в линиях, образующихся на меньших высотах, в частности в линии H_{α} , КД обнаружены не были. Поэтому обычно предполагается, что КД образуются в переходной зоне хромосфера-корона, распространяются в корону и межпланетное пространство, и воздействуют на гелиосферу Земли. КД считаются надежно отождествленными источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра. Расчеты физических условий на разных высотах, где обнаруживается депрессия излучения, показывают уменьшенную плотность и температу-

ру [3].

Эти характеристики легли в основу моделей КД, объясняющих, главным образом, механизм истечения вещества из КД, физические условия и механизм свечения КД на уровне короны. При этом нижними граничными условиями для моделей служат физические условия для невозмущенных областей Солнца в верхней хромосфере.

В большинстве теорий (см., например, [4]), образование КД рассматривается как неизбежное следствие существования униполярной области с открытой конфигурацией магнитных силовых линий. Однако в [5] показано, что наблюдается целый ряд фактов, противоречащих такому представлению. Так, далеко не во всех структурах фоновых полей существуют КД. Скорость вращения КД отличается от скорости вращения структур фоновых полей, в которых эти КД находятся. Если в экваториальной зоне эти скорости близки, то с ростом широты скорости структур фоновых полей уменьшаются быстрее, чем скорости КД. Кроме того, изменение дифференциальности вращения с циклом солнечной активности у КД заметнее, чем у фоновых полей. Это свидетельствует о том, что КД являются не просто участками фоновых полей с открытой конфигурацией магнитного поля. По-видимому, они связаны с потоками магнитных полей, источник которых расположен глубже источника фоновых полей. В этом случае можно ожидать особой структуры и физических условий в КД по всей высоте атмосферы, в том числе в фотосфере и хромосфере на высотах ниже 2000 км.

В предлагаемой диссертационной работе представлены результаты исследований КД в Крымской астрофизической обсерватории за период с 1989 по 2000 гг. Возможность проводить



наблюдения в ИК области спектра на телескопе БСТ-2 [6], в том числе в линии He I, позволила сформулировать задачу изучения свойств КД. Использование спектров и спектрогелиограмм, полученных в линии He I и в других спектральных линиях, а также сопоставление этих данных с изображениями Солнца в X-гау и UV, дает возможность проанализировать структуру КД от фотосферы до короны. Для построения модели КД необходимо решение широкого круга задач. Необходимо знание физических и динамических характеристик КД на разных уровнях атмосферы Солнца, связей КД с окружающими магнитными полями активных областей и фоновых полей, влияния КД на межпланетную среду и солнечный ветер.

Цель работы

Целью данной работы является всестороннее исследование свойств КД в атмосфере Солнца, важных для построения трехмерной модели КД, на основе наблюдений в видимом и ИК диапазонах, полученных на телескопе БСТ-2 в Крымской Астрофизической обсерватории, с привлечением данных в других спектральных диапазонах.

Исследование включает в себя решение следующих задач:

- Создание солнечного мониторинга в линии He I для фундаментальных исследований и Службы Солнца.
- Анализ структуры КД на разных высотах в атмосфере Солнца.
- Исследование физических условий в КД по линиям водорода и гелия.

- Определение динамических характеристик КД в фотосфере и хромосфере.
- Исследование влияния локальных магнитных полей на эволюцию КД.

Научная новизна

1. Выявлено подавление тонкой структуры в средней хромосфере в области КД по сравнению с областями вне КД по наблюдениям в линиях He I и H α .
2. Из сравнения площадей КД на разных высотах в атмосфере Солнца от хромосферы до короны показано, что площади КД могут быть максимальными на разных высотах.
3. На основании измерений доплеровских смещений показано, что скорости радиальных потоков из КД на высоте образования линии He I имеют величину порядка 1 – 3 км/сек, в максимуме до 8 км/сек. Выявлена асимметрия профиля линии He I 1083.03 нм в КД.
4. Обнаружено подавление мощности акустических колебаний в области КД по сравнению со спокойным Солнцем как в фотосфере, так и в хромосфере – на основании анализа осцилляций лучевых скоростей в линиях He I и Si I 1082.71 нм.
5. Создана программа и проведены не-ЛТР расчеты физических условий в КД. На основании расчетов сделан вывод о понижении температуры на 200-300К и уменьшении плотности в 2-2.5 раза в верхней хромосфере на высотах формирования линии He I.
6. Проанализированы процесс разрушения КД при выходе нового магнитного потока и процесс образования КД в результате

интенсивной хромосферной вспышки.

Научное и практическое значение

Исследование характеристик КД в Крымской обсерватории привело к обнаружению ряда особенностей КД в атмосфере Солнца. Выявлены отличия структуры КД на разных высотах, рассмотрены динамические характеристики и физические параметры атмосферы, ситуации образования и разрушения КД. Исследования КД приводят нас к выводу о том, что КД - самостоятельное солнечное образование, которое возникает в подфотосферных слоях и пронизывает всю атмосферу Солнца. Это может быть выход на поверхность однородного по знаку магнитного потока, возникшего на глубинах больших, чем глубина возникновения фонового поля, и только на каком-то этапе объединяющегося с ним.

Полученные результаты по-новому ставят вопрос об определении корональных дыр как областей с открытыми магнитными полями с расходящейся системой силовых линий. То обстоятельство, что КД являются источниками высокоскоростного солнечного ветра, воздействующего на магнитосферу Земли, также обуславливает практическую значимость исследований КД.

Разработана система проведения наблюдений в линии He I и их обработки, организация ежедневного мониторинга и оперативного представления данных наблюдений в INTERNET, создание базы данных. Это позволило КрАО участвовать в национальных и международных программах наблюдений "Служба Солнца", "Space Weather" и других.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих совещаниях: заседание секции Солнца РАН "Физика солнечных геоэффективных процессов", Москва, ИЗМИРАН, декабрь 1990 г.; рабочая группа "Солнечная активность и прогнозирование солнечной активности", Москва, ИЗМИРАН, декабрь 1992 г.; совещание по базам данных, Москва, ИНАСАН, апрель 1992 г.; III съезд Украинской Астрономической Ассоциации, Киев, 1995 г.; 4th European Astronomical Society Meeting JENAM-95, "Progress in European Astrophysics", Катания, Италия, сентябрь 1995 г.; Конференции памяти Пикельнера, Москва, ГАИШ, сентябрь 1996 г.; IV Russian Symposium "Mathematical Models of the Sun-Earth Environment", Москва, декабрь 1996 г.; 13-я школа-семинар по физике Солнца, посвященной памяти Е.А.Макаровой, Москва, декабрь 1996 г.; Summerschool and Workshop "Motions in the Solar Atmosphere", Kanzelhoe Solar Observatory, Австрия, август – сентябрь 1997 г.; ASI "Advances in Solar Research at Eclipses, from Ground and from Space", Бухарест, Румыния, август 1999 г.; Summerschool and Workshop "Dynamic Sun", Kanzelhoe Solar Observatory, Австрия, август – сентябрь 1999 г.; Workshop "Helium Line Formation in Dynamical Solar Atmosphere", Неаполь, Италия, апрель 2000г.; "JENAM - 2000", Москва, июнь 2000г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Общий объем диссертации 129 страниц, включая 57 рисунков и 112 библиографических ссылок.

На защиту выносятся

1. Методика наблюдений в ИК линии He I и обработки данных с Универсальным спектрофотометром на телескопе БСТ-2 в Крымской Астрофизической обсерватории; создание мониторинга изображений Солнца в линии He I и представление данных в INTERNET.
2. Результаты исследования корональных дыр в хромосфере и фотосфере Солнца по наблюдениям в линиях He I и H α . Обнаружение отличия в структуре КД и их границ в средней хромосфере по сравнению с областями вне КД.
3. Результаты исследования зависимости площади КД от высоты; вывод о том, что площади КД могут быть максимальными на разных высотах.
4. Результаты измерений доплеровских смещений спектральных линий в КД. Вывод о том, что скорости радиальных потоков из КД на высоте образования линии He I 1083.03 нм имеют величину порядка 1–3 км/сек с пиками до 8 км/сек.
5. Результаты исследований акустических колебаний в КД и в спокойной фотосфере – на основании анализа осцилляций лучевых скоростей по наблюдениям в линиях He I и Si I 1082.71 нм. Обнаружение подавления мощности акустических колебаний в области КД по сравнению со спокойным Солнцем как в фотосфере, так и хромосфере.

6. Создание программы и проведение модельных расчетов физических условий в КД на основании не-ЛТР теории. Вывод о понижении температуры на 200-300К и уменьшении плотности в 2-2.5 в КД в верхней хромосфере – на высоте образования линии гелия.

Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность темы исследования, приводится обзор исследований КД, показывается место и роль данной работы в тематике научных исследований физики Солнца, формулируются цели работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор свойств линии He I, описывается методика наблюдений и обработки данных, создание мониторинга; проводится сравнение наблюдений КД в КрАО и в других обсерваториях.

Наблюдения КД в Крымской астрофизической обсерватории проводятся на башенном солнечном телескопе БСТ-2 с дифракционным спектрографом и Универсальным спектрофотометром (УСФ). Возможны два вида наблюдений: а) получение спектра выбранной детали на Солнце; б) запись карты всего Солнца или отдельного участка в выбранной длине волны в интервале 390-1085 нм. Наблюдения, как правило, включают получение карты Солнца в линии He I в течение 10 -15 минут. Сервисные программы позволяют в течение нескольких минут учесть потемнение к краю и проанализировать карту для выявления КД.

При активном участии автора диссертации, в последние годы была проведена модернизация УСФ. Заменено главное зеркало телескопа, изменена система сканирования, добавлено второе приемное устройство. Существенные изменения внесены в электронные схемы, программное обеспечение наблюдений и обработки полученных материалов.

Модернизация УСФ и математического обеспечения существенно улучшила качество наблюдательного материала. Это позволило ставить новые задачи исследования структуры и динамики различных образований на поверхности Солнца с лучшим пространственным и временным разрешением. Стало возможным организовать мониторинг, проводить ежедневные наблюдения и помещать изображения Солнца в линии He I на WWW-странице КрАО

<http://www.crao.crimea.ua/Projects/solar/Helium/>.

Разработаны методики обработки изображений и спектров, которые включают новые способы обработки данных, носят общий характер и могут быть использованы для обработки данных в других экспериментах. Детальное описание методики обработки спектров приведено в Приложении.

Во второй главе проводится анализ структуры КД на разных высотах в атмосфере Солнца.

Мы проводили исследования КД в верхней хромосфере по наблюдениям в линии He I, полученным на телескопе БСТ-2. Обычно положение КД на картах определялось как области с повышенной яркостью на 1-3%. Известно также, что КД имеют пониженный контраст хромосферной сетки. Поэтому мы количественно исследовали как характеристики контраста хромо-

сферной сетки в области КД, так и изменение контраста на границах КД. Для данного анализа использовался метод секвентного анализа, основанный на теории распознавания образов.

В результате исследований показано, что область КД можно условно разделить на три части. В области внешних границ КД по направлению к ее центру происходит постепенное увеличение интенсивности и уменьшение контраста хромосферной сетки. Ближе к внутренней центральной части КД наблюдается резкое падение контраста до минимальных величин, что можно интерпретировать как границу КД по значению контраста. Во внутренней части контраст уже минимален и не происходит значительных изменений структуры. Разное изменение контраста и интенсивности указывает на различные механизмы, ответственные за эти два явления.

При изучении КД на разных уровнях атмосферы Солнца мы определяли положение КД как проекцию изображения КД в линии He I на изучаемый уровень. После этого анализировались корреляционные характеристики совмещенных изображений.

Было проведено сравнение структуры хромосферы в корональных дырах на высотах свечения центра линии H_{α} (1000 км) с характеристиками хромосферы на высоте свечения He I (2000 км). Также была детально изучена тонкая структура H_{α} хромосферы в области КД для 11 корональных дыр.

В области границ КД на H_{α} изображениях наблюдается замкнутая цепочка темных точек, очерчивающая область КД, внутри которой отсутствуют волоконца и наблюдаются только точечные структуры. Полное отсутствие волоконцев в области КД говорит о том, что тангенциальная составляющая поля здесь практически отсутствует. Наличие темных точек на H_{α} сним-

ках в области КД свидетельствует о присутствии продольного поля в ней.

Решение вопроса о структуре КД существенно для понимания природы КД и условий возникновения высокоскоростных потоков солнечного ветра. Одной из основных характеристик структуры КД является изменение её площади с высотой. Знание этой величины позволяет судить о характере расходимости силовых линий магнитного поля в КД.

На основе сравнения наблюдений на космическом телескопе SKYLAB с наземными наблюдениями в линии He I было найдено, что, как правило, каждой КД, наблюдаемой в линии гелия, соответствует КД такого же размера в наблюдениях в мягком рентгеновском диапазоне. Однако некоторому количеству КД небольшого размера, наблюдаемых в линии гелия, нет соответствующих КД в рентгеновском диапазоне.

Мы количественно исследовали этот вопрос. Для этого было проведено сравнение площадей КД по наблюдениям в линии He I на телескопе БСТ-2, по данным SXT, YONKON (20Å) и данным эксперимента Терек на космическом аппарате КОРОНАС (174Å и 304 Å). Эти наблюдения охватывают разные высоты в атмосфере Солнца от хромосферы до короны.

Анализ данных позволил сделать следующие выводы. КД дыры имеют сложную структуру границ, меняющуюся как от КД к КД, так и с высотой. Не все КД, отождествленные в хромосфере, имеются в короне. Часть КД наблюдается только на нижнем уровне и отсутствует на верхнем. Изменение площади с высотой различно для разных КД, и для каждой отдельной КД характер изменения площади сохраняется по крайней мере в течение нескольких дней. Площади КД могут достигать

максимума на разных высотах.

Полученные результаты по-новому ставят вопрос об определении КД как областей с открытыми магнитными полями с расходящейся системой силовых линий.

В третьей главе определяются физические условия в КД на всем протяжении хромосферы на основании не-ЛТР расчетов профилей спектральных линий водорода и гелия и сравнения их с наблюдаемыми спектрами.

Такие исследования включают оценку роли подсветки в формировании рассматриваемых линий, определение параметров потемнения к краю, определение характерных профилей спектральных линий для КД и характера неоднородностей хромосферы, не-ЛТР расчеты и выбор моделей, наилучшим образом описывающих контуры линий, полученные в наблюдениях.

Спектральные наблюдения были получены на телескопе БСТ-2 с УСФ в различных участках диска Солнца. Все спектры были разделены на три группы в соответствии с типом образований на Солнце: спокойные области вне КД, КД и активные области. Разделение данных было сделано на основе значений интенсивности на изображениях Солнца в линии He I. Для анализа параметров контуров в каждый исследуемый профиль линии были вписаны контуры Лоренца, и в дальнейшем анализировались их параметры в зависимости от положения на диске и объекта исследования.

Все параметры вписанных профилей показывают различное изменение значений в зависимости от положения на диске Солнца. Получено увеличение глубины линий H_{α} и He I, и уменьшение глубины линии R_{γ} , такое же как было получено на картах

для полного диска. То есть, наблюдается поярчание изображения в линии P_γ к краю диска. В линии $He\ I$ наблюдается увеличение её полуширины к краю диска, а в линиях H_α и P_γ значительное уменьшение полуширины.

Из рассмотрения нормированных спектров и изображений Солнца в разных длинах волн сделаны следующие выводы. Параметры линии $He\ I$ в спектрах КД заметно отличаются от спектров спокойной фотосферы – уменьшением глубины линии на 1-4% и увеличением полуширины на 10%. Изменения эквивалентной ширины линии гелия в КД определяется изменением полуширины, а для активных областей (АО) - интенсивности. Полуширины линии $He\ I$ в АО и в спокойных областях почти не отличаются. В отличие от $He\ I$, изменения интенсивности линий H_α и P_γ в АО коррелируют с изменением полуширины.

При анализе спектров в КД в линии H_α получено увеличение среднего значения интенсивности на 2% по сравнению с невозмущенной областью Солнца вне КД, а в спектрах линии P_γ увеличение полуширины линии на 3%. При этом интервал значений интенсивности в линии H_α в КД меньше, чем для невозмущенных областей вне КД, что говорит о более однородной структуре хромосферы в КД на уровне образования линии H_α . Результаты спектральных исследований в линии H_α согласуются с результатами, полученными на основе сопоставления карт в $He\ I$ и H_α в Главе 2. Исследования в области P_γ были проведены впервые, поэтому нет возможности сопоставить результаты об увеличении полуширины линии P_γ с результатами других исследований.

Также мы рассмотрели отношение эквивалентных ширин компонент линии $He\ I$ 1083.0 нм и 1082.9 нм. В теории образования

линий считается, что это отношение постоянно и равно 8:1. Мы получили среднее значение 5.2:1, разделение же точек по объектам еще уменьшает эту величину. Тем не менее, полученный результат согласуется с работами других авторов, исследующих спектры в линии гелия, и часто объясняется неоднородностью хромосферы.

Мы определили также значения контраста контура линии He I на интервалах длин волн 0.03 и 0.06 нм. Значения контраста, соответствующие КД, систематически смещены в коротковолновую сторону и имеют характерные значения около 1%. Сопоставление двух значений контрастов позволяет сделать вывод об асимметрии линии He I в области КД. Полученные результаты могут указывать на неравномерность распределения скорости потоков вещества вверх из корональных дыр в области формирования линии He I.

Для проведения расчетов физических условий в хромосфере в области КД мы использовали полученные нами профили в линии He I, а также спектры в линии L_{α} , полученные другими авторами. Особенности профилей других водородных линий в КД на этом этапе не учитывались.

Линии He I и L_{α} формируются в верхней хромосфере, но влияние ультрафиолетовой радиации на формирование L_{α} линии в 10 раз слабее, чем на формирование линии He I. В этом случае не ожидается значительного уменьшения интенсивности линии L_{α} в области КД. Однако анализ спектров показывает, что интенсивность линии L_{α} в области КД уменьшается примерно в 3.4 раза. Таким образом, одновременное изменение параметров этих спектральных линий в области КД невозможно объяснить только изменением коронального излучения. Поэто-

му мы исследовали различные хромосферные модели, которые могли бы объяснить наблюдаемые профили линий L_{α} и He I.

Для расчета профилей мы использовали программу типа Пандора. Мы решали совместно уравнения переноса излучения и статистического равновесия, чтобы определить населенности уровней и далее интенсивности линий. Для расчетов спектра гелия нами был разработан специальный метод решения уравнения статистического равновесия многоуровневого атома с произвольным числом рассматриваемых уровней. В данной задаче мы рассматривали 9 уровней и континуум для – атома водорода и 16 уровней и континуум – для атома гелия.

Мы выполнили вычисления для набора моделей, сходных с моделью Vernazza C, имеющих различные температуры и плотности в верхней хромосфере. Расчеты показали, что уменьшение температуры в области формирования линии гелия на 300K и уменьшение плотности в верхней хромосфере в 2.8 раза приводит к уменьшению интенсивностей линий He I и L_{α} в соответствии с наблюдаемыми изменениями в области КД. В такой модели роль ультрафиолетовой подсветки не играет определяющей роли.

В четвертой главе проведено исследование динамических свойств КД. Определены скорости солнечного ветра в КД на уровне верхней хромосферы и изучены колебания лучевых скоростей в фотосфере и верхней хромосфере.

Идентификация источника солнечного ветра в атмосфере Солнца остается фундаментальной проблемой солнечной физики. Эксперименты показывают, что высокоскоростной ветер образуется как в полярных, так и в экваториальных КД. Ско-

рость солнечного ветра над КД на высоте двух радиусов Солнца достигает величины 200 км/сек. Уменьшение интенсивности корональных линий хорошо исследовано, и свидетельствует об уменьшении плотности и температуры, но все еще не выявлены устойчивые динамические структуры в самой солнечной атмосфере. Также неизвестно изменение скорости солнечного ветра с высотой. Для изучения поля скоростей в верхней хромосфере в области КД, мы использовали спектры КД в области линии He I, полученные 17 апреля 2000 г на Вакуумном Солнечном телескопе обсерватории Китт-Пик (USA) с высоким пространственным разрешением.

Все спектры были обработаны по разработанной нами методике. Привязка к длинам волн осуществлялась по солнечным фотосферным линиям. Были рассмотрены дифференциальные параметры положения линии He I относительно среднего профиля в невозмущенном Солнце. Построенные карты лучевых скоростей в верхней хромосфере с высоким пространственным разрешением показывают в КД наличие потоков солнечного ветра со скоростями 2–4 км/сек в среднем по области КД, а в отдельных узлах скорости достигают 8 км/сек.

Изучение колебаний плазмы в области КД и в соседних невозмущенных областях в фотосфере и хромосфере может решить вопрос о локализации источников высокоскоростных потоков солнечного ветра, также прояснить природу КД. В связи с этим нами была поставлена задача изучения спектров колебаний лучевых скоростей в фотосфере и хромосфере в области КД.

В 1994 г. на телескопе БСТ-2 в КрАО были проведены специальные спектральные наблюдения КД и невозмущенного Солн-

ца вне КД. Анализировалось изменение со временем положения спектральных линий Si I и He I. Линия Si I образуется в фотосфере, а линия He I – в верхней хромосфере на высоте около 2000 км. Для этих рядов наблюдений в области частот 1–40 мГц методом Диминга были построены периодограммы. На основании индивидуальных периодограмм для рассматриваемых спектральных линий вычислялись суммарные спектры мощности (СМ) – отдельно для КД и спокойного Солнца вне КД. Все СМ в рассматриваемой области частот содержат группу значимых пиков в интервале 2 – 10 мГц. Для частот, больших 10 мГц, амплитуды пиков значимо не превышают уровень шумов. Сравнение спектров мощности, полученных в КД и спокойных областях вне корональных дыр позволило сделать следующие выводы:

- В СМ для фотосферы спокойного Солнца вне КД найдена частота 3.3 мГц, соответствующая 5-минутным фотосферным осцилляциям. В КД эти осцилляции подавлены.

- В СМ для хромосферы спокойного Солнца вне КД имеется серия пиков на частотах 2.77, 3.23 и 3.78 мГц, с главным компонентом 3.23 мГц. Амплитуда этих осцилляций в 2 раза больше, чем в фотосфере. В спектре мощности КД эти осцилляции подавлены.

- В области спокойного Солнца вне КД общая мощность низкочастотных колебаний больше, чем в КД на обоих уровнях.

Таким образом, нами обнаружено подавление акустических колебаний в области КД по сравнению со спокойным Солнцем как в фотосфере, так и в хромосфере.

В пятой главе рассматривается влияние локальных магнитных

полей на эволюцию КД.

Процессы возникновения и разрушения КД во многом остаются невыясненными. В работе [?] показано, что в большинстве случаев разрушение КД является результатом столкновения границы КД с границей крупномасштабного магнитного поля (МП) или в результате образования нового магнитного потока внутри КД. Детали этого процесса оставались неопределенными из-за низкого временного разрешения в этом исследовании.

В данной главе мы рассматриваем два типа событий, оказывающих значительное влияние на эволюцию КД: разрушение КД в результате выхода нового магнитного потока и образование двух небольших КД в результате интенсивной вспышки.

Была рассмотрена эволюция КД в течение 9 оборотов. В течение нескольких дней с 3 по 11 ноября 1999 г. в КД происходил выход слабого магнитного потока и образование АО NОАО 8762. Нами были получены и исследованы изображения Солнца в линии He I. Выходу магнитного потока предшествовало появление области разрыва внутри КД. Далее в процессе увеличения магнитного потока сохранялась пограничная зона между КД и АО. 11 ноября границы области разрыва достигли внешних границ КД, и за этим последовало стремительное разрушение всей N-части КД. Мы определили площади области разрыва внутри КД и площадь АО, сделали оценки величины магнитного поля в течение процесса разрушения КД. Особо отметим, что первоначальные границы КД практически не менялись до момента подхода к ним границы области с большим полем.

Солнечная вспышка 6 июня 2000 года – одна из мощнейших

вспышек за всю историю наблюдений. Она характеризовалась мощными выбросами заряженных частиц, за 2 дня дошедших до Земли. Вспышка наблюдалась в линии He I на телескопе БСТ-2 в течение UT 13:03 – 15:53. В отдельных узлах яркость вспышки достигала величины 1.6 интенсивности спокойного Солнца и 1.9 интенсивности подложки. Подсчет энергии, выделенной за 1 час (UT 14:45 – 15:45) только одной областью вспышки, имеет величину порядка 2×10^{28} эрг. Для всей вспышки выделенная энергия в линии He I достигает величины 10^{29} эрг. Значительная перестройка магнитных полей во время вспышки привела к образованию двух КД в непосредственной близости к АО. Одна из вновь образованных КД разрушилась в течение следующих 2 дней, вторая наблюдалась по крайней мере 4 дня после вспышки. Таким образом, хромосферная вспышка большой интенсивности может привести к образованию стабильной КД.

В Заключение приводятся и обсуждаются основные результаты диссертации, формулируются основные научные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Разработана система проведения наблюдений в линии He I и их обработки, организован ежедневный мониторинг и оперативное представление данных наблюдений в INTERNET, создана база данных наблюдений. На основании наблюдений, полученных в оптическом и ИК диапазонах на телескопе БСТ-2, и данных, полученных в других экспериментах, было проведено всестороннее исследование КД в атмосфере Солнца.

Анализ структуры КД на разных высотах в атмосфере Солнца показал, что:

- Тонкая структура в области КД в средней хромосфере подавлена по сравнению с областями вне КД по наблюдениям в линиях He I и H_α .

- По наблюдениям в линии He I в КД можно выделить 2 области - граничную и внутреннюю, которые существенно отличаются по соотношению яркости и контраста хромосферной сетки.

- На H_α изображениях в области границ КД наблюдается замкнутая цепочка темных точек, очерчивающая область КД, внутри которой отсутствуют волокна и наблюдаются только точечные структуры.

- Изменение площади с высотой различно для разных КД, и для каждой отдельной КД данная зависимость сохраняется по крайней мере в течение нескольких дней. Площади КД могут достигать максимума на разных высотах.

Исследование спектров водорода и гелия в области КД привело к следующим выводам:

- Профили линии He I в спектрах КД отличаются от профилей вне КД значительным уменьшением глубины линии и увеличением полуширины. В линии H_α наблюдается уменьшение глубины линии в КД на 2%. Вариации интенсивности линии H_α в КД меньше, чем вне КД, что говорит о более однородной структуре хромосферы в КД.

- Не-ЛТР расчеты физических условий показали уменьшение температуры в области формирования линии гелия на 300К и уменьшение плотности в верхней хромосфере в 2-2.5 раза, что приводит к хорошему согласию расчетных и наблюдаемых профилей линий He I и L_α без привлечения ультрафиолетовой подсветки.

Из исследования динамических характеристик КД получены следующие результаты:

- Показано наличие потоков солнечного ветра в верхней хромосфере со скоростями 1–3 км/сек в среднем по области КД. В отдельных узлах скорости достигают 8 км/сек

- Обнаружена асимметрия линии He I в области КД на основании исследования контраста в крыльях этой линии.

- Из сравнения спектров мощности колебаний лучевых скоростей в КД и спокойных областях вне КД в хромосфере по линии He I и в фотосфере по линии Si I обнаружено уменьшение мощности колебаний в области КД на обеих высотах.

Описаны и проанализированы два события, оказавшие влияние на эволюцию КД:

- Изучен процесс выхода нового магнитного потока внутри КД. Определены скорости изменения площади КД и величины нового магнитного потока. В процессе разрушения внутренней части границы КД практически не менялись до момента подхода к ним области с большим полем.

- Проведены наблюдения мощной вспышки 6 июня 2000 г. В отдельных узлах яркость вспышки достигала величины 1.6 интенсивности спокойного Солнца. Значительная перестройка магнитных полей во время вспышки привела к образованию двух КД в близи АО. Одна из которых разрушилась в течение следующих 2 дней, вторая наблюдалась по крайней мере 4 дня после вспышки.

Полученные результаты позволяют дополнить морфологическую модель КД и сделать ряд предположений о природе КД. Подавление осцилляций в КД на уровне фотосферы свиде-

тельствует о том, что источник КД находится в подфотосферных слоях. Отличия физических условий и особенности тонкой структуры в КД становятся заметными уже на уровне образования линии H_{α} , и существенны на высоте образования линии He I. Потоки солнечного ветра на уровне образования He I достигают скорости 2–8 км/с. Наличие КД на уровне образования линии He I не является достаточным условием существования открытой магнитной конфигурации магнитного поля в короне. Однако, и на уровне образования He I существование КД тесно связано с эволюцией окружающих магнитных полей. Выход нового магнитного потока приводит к разрушению КД, а сильная вспышка - к ее образованию.

Комплексные исследования КД приводят нас к выводу о том, что КД - самостоятельное солнечное образование, возникающее в подфотосферных слоях и пронизывающее всю атмосферу Солнца. Это может быть выход на поверхность однородного по знаку магнитного потока, возникшего на глубинах больших, чем глубина возникновения ФП, и только на каком-то этапе объединяющегося с ним.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Е.Маланушенко. Обнаружение корональных дыр по наблюдениям в линии He I 1083.03 нм// Изв. КрАО, 1992, т.89, с.93-98. А также : Е.Маланушенко. Обнаружение корональных дыр по наблюдениям в линии He I 1083.03 нм// Сб. Солнечный Цикл, Санкт-Петербург: ФТИ, 1993, стр. 173-182.
2. Е.В.Маланушенко, Н.Н.Степанян. Некоторые характеристики корональных дыр в нижней и верхней хромосфере Солнца.

//Кинематика и физика небесных тел. 1994, т. 10, N6, стр. 51-58.

3. В.П.Маланушенко, Е. В. Маланушенко, Н.Н Степанян. Движения в области корональных дыр и вне их. // Известия Академии Наук, Сер. Физическая, 1995, т. 59, N.9, стр. 152-156.

4. E.Malanushenko, V.P.Malanushenko, N.N.Stepanian. Physical Conditions and Velocity Fields in Coronal Holes. 1. Radial Velocity Oscillations In and Out of Coronal Holes. Astronomical and Astrophysical Transactions, 1997, v.13, pp.167-172. А также: E.Malanushenko, V.P.Malanushenko, N.N.Stepanian. Radial Velocity Oscillations in Coronal Holes and outside them. // In: "Motions in the Solar Atmosphere", A. Hanslmeier and M. Messerotti (eds), 1999, Kluwer Academic Publishers, pp. 251-254.

5. Э.А. Барановский, Е. Маланушенко, А.Шумко. Исследование хромосферы продолжительной вспышки. Астрономический журнал, 1997, т.74, N.3, сс.454-459.

6. E.Malanushenko, E.Baranovsky. Physical Condition in Solar Coronal Holes on the base non-LTR Calculations. //In: "Dynamic Sun", Proc. Summerschool and Workshop held at the Solar Observatory Kanzelhoehe, Austria, Aug 30 - Sept 10, 1999, A. Hanslmeier, M. Messerotti and A. Veronig (eds), Kluwer Academic Publishers, Astrophysics and Space Science Library, v. 259, pp. 235-239.

7. E.Malanushenko, The He I 10830 A Observation of the Flare on July 9, 1996. //Astronomical and Astrophysical Transactions, 1999, v.18, pp. 273-277.

8. E.Malanushenko, N.N.Stepanian. Areas of coronal holes at the levels of solar chromosphere and corona. // In: IV Russ. Symp. "Mathematical Models of the Sun-Earth Environment", eds. Kropotkin A.P., Antonova A.E., Veselovsky I.S., Moscow: MSU, 1996, p.41, (Abstract)

9. Н.Н.Степанян, Е.В.Долгополова, А.И.Елизаров, Е.В.Маланушенко, К.В.Парчевский, Г.А.Суница. Солнечный Универсальный Спектрофотометр // Изв. КрАО, 2000, т. 96, с. 194.

10. Н.Н. Степанян, Е.В. Маланушенко. Связь корональных дыр с окружающими магнитными полями. // Изв. КрАО, 2001, т. 97, с. 76.

11. Е.В. Маланушенко, Н.Н. Степанян. Наблюдения Солнца в линии HeI 1083 нм в КрАО в 1999-2000 годах. Солнечная вспышка 6 июня 2000 г и разрушение корональной дыры в ноябре 1999 г. // Изв. КрАО, 2001, т. 97, с. 69.

Личный вклад

Наблюдения на телескопе БСТ-2 Крымской обсерватории - ежедневные наблюдения Солнца в линии He I и реализация специальных научных программ, в том числе участие в международных наблюдательных проектах 1991-2000гг. Разработка программ обработки и анализа наблюдений, поддержка базы данных, подготовка материала для WWW - страницы [http : //www.crao.crimea.ua/Projects/solar/Helium/](http://www.crao.crimea.ua/Projects/solar/Helium/).

В работах [2, 3, 4, 8, 10, 11] принимала участие на всех стадиях работы. Все программное обеспечение подготовлено автором.

В работе [9] разработаны программы наблюдений и их обработки. Участие в тестировании и наладке аппаратуры.

В работе [5] получено аналитическое решение уравнения статистического равновесия многоуровневого атома, составлен алгоритм решения и подготовлены программы, интегрированные в базовую программу не-ЛТР расчетов Барановского Э.А.

В работе [6] постановка задачи и расчеты по базовой про-

грамме не-ЛТР расчетов Барановского Э.А.

Цитируемая литература

1. Jones H.P. Interpreting recent observations of He I 10830Å. // Infrared Solar Physics, IAU Symp. N 154, ed. Rabin, D.M., Jefferies, J.H. and Lindsey, C., Tucson, 1994, p. 49.
2. Andretta V., Jones H.P.: On the role of the solar corona and transition region in the excitation of the spectrum of neutral helium. // Ap.J, 1997, v. 489, p. 375.
3. Borovik V.N., Kurbanov M.Sh., Livshits M.A., and Rjabov V.I. Coronal Holes against the background of the quiet sun: observations with the RATAN-600 in the 2–32 cm range. //Astron. Zh., 1990, v. 67, p. 1038.
4. Kovalenko V.A. Energy balance of the corona and the origin of quasi-stationary high-speed solar wind streams.// Solar Phys., 1981, v. 73, p. 383.
5. Степанян Н.Н. Корональные дыры и фоновые магнитные поля. //В сб. "Солнечный цикл", Санкт-Петербург, ФТИ, 1993, с.36.
6. Степанян Н.Н, Долгополова Е.В., Елизаров А.И., Маланушенко Е.В., Парчевский К.В., Суница Г.А. Солнечный Универсальный Спектрофотометр // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., т. 96, с. 194.

Часть работы выполнена в рамках проектов:

INTAS-97-1088 "Support for the SOHO Maximum Science Mission" at Crimean group of solar observation in HeI 10830 line.

INTAS-94-2521 "Ground-based support for SOHO: the Solar and Heliospheric Observatory" at Crimean group of solar observation in HeI 10830 line.



2.00

© Главная астрономическая обсерватория РАН, 2001.
Тираж 100 экз.